

低緯度および高緯度における Pc 型地磁気脈動の特性の対比 (I) —Pc 1 型脈動

桑島正幸*・外谷 健**・河村 謹**

Comparative Study of Magnetic Pc-Type Pulsations at Low and High Latitudes (I)—Pc 1 Pulsations

Masayuki KUWASHIMA*, Takeshi TOYA** and Makoto KAWAMURA**

Abstract: Statistical features of Pc 1 pulsations were studied on the basis of data obtained at a low-latitude station, Memambetsu in Japan and at a high-latitude station, Syowa Station in Antarctica, for the period of February 1977 to January 1978. The low-latitude Pc 1 shows distinct difference from the high-latitude one in diurnal and seasonal variations of frequency of occurrence, mean and repetition periods and dependencies on general geomagnetic activity (*Dst* and *Kp*). A source region associated with the low-latitude Pc 1 may be located further inside in the magnetosphere than that associated with the high-latitude one

要旨: 1977 年 2 月から 1978 年 1 月の期間、中低緯度の観測点女満別と極光帯に位置する昭和基地で得られた Pc 1 を対象にして、その特性の対比を目的とした解析を行った。その結果両者の間には、出現頻度の日変化および季節変化、中心周期、地磁気活動 (*Dst*, *Kp*) 等で大きな相違がみられる。このことは両者の発生領域が異なることを示していると考えられる。

1. 序

Pc 1 型脈動 (中心周期 0.2–5 秒) は IGY 以後の磁気テープ記録装置の発達により、多くの研究者によって解析されてきた (BENIOFF, 1960; SAITO, 1960; HEACOCK and HESSLER, 1962, 1965; TROITSKAYA, 1967; KAWAMURA, 1977). 中低緯度における Pc 1 は pearl pulsation と continuous emission に大別される (KAWAMURA, 1970). 前者は dynamic spectrum 上で 2–3 分のくり返しで周期的に出現する micro-structure を示す。後者は dynamic spectrum 上で連続的にみられ、micro-structure を示さない。一方、高緯度では多くの型の Pc 1 が報告されている。たとえば HM whistler, periodic HM emission, HM chorus および sweeper な

* 気象庁地磁気観測所女満別出張所。Magnetic Observatory, 62 Showa, Memambetsu-cho, Abashirigun, Hokkaido 099–23.

** 気象庁地磁気観測所。Magnetic Observatory, 595 Kakioka, Yasato-machi, Niihari-gun, Ibaraki 315–01.

とてある (KOKUBUN and OGUTI, 1968; KOKUBUN, 1970) HM whistler は中低緯度での pearl pulsation に, また HM chorus は continuous emission にそれぞれ対応する.

このように Pc 1 は中低緯度および高緯度のいずれでも観測されるが, その特性の対比については十分な解析がなされていない. 本論文では中低緯度の観測点として女満別 (地磁気緯度 34.0° , 地磁気経度 208.4°), 高緯度の観測点として昭和基地 ($-66.7^\circ, 72.4^\circ$) で得られた資料を基にして両者の特性の対比を行う. 昭和基地および女満別の共役点の位置を図 1 に示

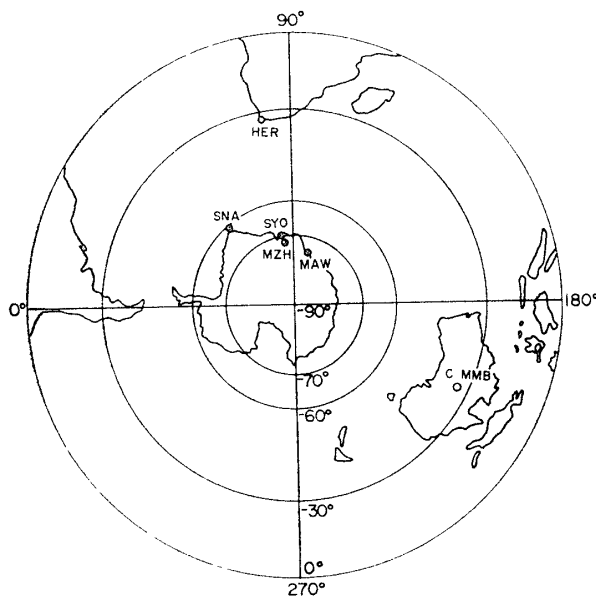


図 1 観測点の地磁気的位置. SYO 昭和基地, C. MMB. 女満別の共役点

Fig 1 Geomagnetic location of the stations used in the present analysis. SYO Syowa Station. C MMB. Conjugate point of Memambetsu

す. 両観測点には同等の特性を持った誘導磁力計が設置されており (KAWAMURA, 1977; KUWASHIMA, 1978), 増幅された信号は磁気テープに記録される. 記録された磁気テープは高速で再生され, スペクトラル・アナライザー (SD 360 型) で解析される (KAWAMURA and KUWASHIMA, 1977)

3 節で統計的な解析結果を示し, 4 節で 1 例について Pc 1 の磁気圏赤道面上での伝搬経路を推定する. 5 節で結果に対する考察を加える.

2. 中低緯度および高緯度における Pc 1 の例

2.1. 中低緯度 Pc 1

中低緯度で観測される典型的な Pc 1 の例 2 つを図 2 に示す. 2 例共に pearl pulsation 型である. April 11 の 1408–1638 UT にみられる Pc 1 (図 2 上部) では中心周期が 1.3 秒 (1430 UT) から 2.0 秒 (1630 UT) に時間とともに長くなっている. また同時にくり返し周期も 1430 UT で約 90 秒, 1630 UT で 150 秒と長くなっている. HEACOCK and HESSLER (1962) によれ

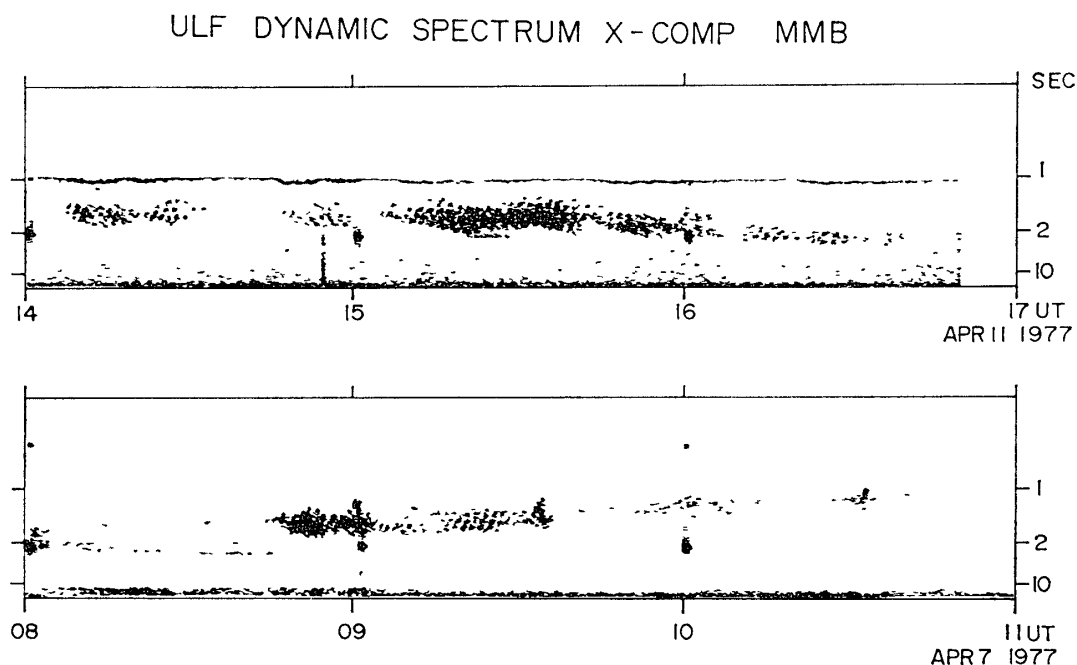


図 2 女満別で 1977 年 4 月 11 日 (上) と 4 月 7 日 (下) に観測された pearl pulsation 型 Pc 1 のダイナミック・スペクトラム

Fig. 2. Dynamic spectra of the pearl pulsation type Pc 1 event observed at Memambetsu on April 11 (upper) and April 7 (bottom), 1977.

ば pearl pulsation における中心周期 (T_m) とくり返し周期 (T_r) との間には経験的に次のような関係があるとされる。

$$T_r = 86 \cdot T_m$$

April 11 event における pearl pulsation の周期はこの経験則と定性的には合致している。

April 7 の例 (図 2 下部) では pearl pulsation の周期が時間とともに短くなっている。0850 UT で中心周期は 1.9 秒であるが、1030 UT では 1.0 秒と短くなっている。0915 UT 付近にみられる中心周期 1.3 秒、くり返し周期 120 秒は前に述べた経験則と合致する。

2.2. 高緯度 Pc 1

図 3 に高緯度で観測される典型的な Pc 1 の例を示す。この Pc 1 も pearl pulsation に属するもので rising tone がみられる。しかし中心周期は図 2 に見られる中低緯度の event に比較してかなり長い。中心周期は 1040 UT の 2.4 秒から 1350 UT で 3.6 秒と時間がたつにつれて長くなっており、対応してくり返し周期も 210 秒から 300 秒に変化している。図 2 および図 3 にみられる中低緯度と高緯度における Pc 1 の周期の違いは 3 節における統計結果においてさらに明らかに示される。

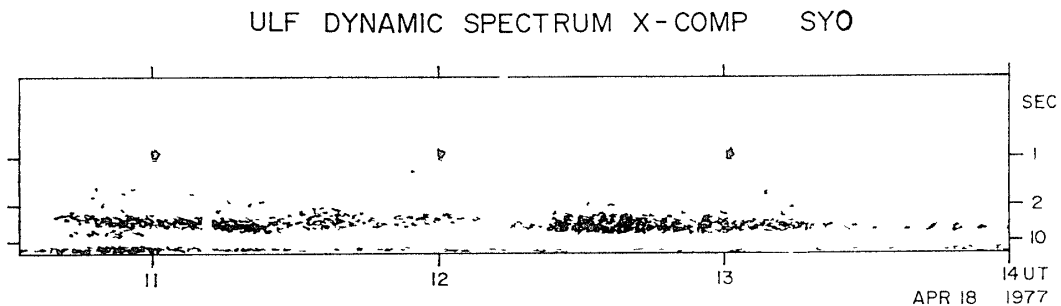


図 3 昭和基地で 1977 年 4 月 18 日に観測された pearl pulsation 型 Pc 1 のダイナミック・スペクトラム

Fig 3 Dynamic spectrum of the pearl pulsation type Pc 1 event observed at Syowa Station on April 18, 1977

3. 中低緯度および高緯度における Pc 1 の統計的特性

3.1. 出現頻度

Pc 1 における大きな問題の 1 つは、研究者によって報告される Pc 1 の出現頻度の日変化が同一ではなく、多くの相異なる結果が出されていることである (SAITO, 1969). 中低緯度では Pc 1 は夜側の現象とされるが (KATO and SAITO, 1964; KAWAMURA, 1970), 高緯度における Pc 1 はむしろ昼側に多く見られる (KOKUBUN, 1970). この傾向を確かめるために、女満別および昭和基地での Pc 1 出現頻度の日変化をみる。1 節に述べたように両観測点には同等の特性を有する観測装置が設置されており、したがって現象の比較が可能である。解析期間は 1977 年 2 月から 1978 年 1 月の 1 年間である。Pc 1 event は、spectral analyzer によって作成される dynamic spectrum から 20 分単位で読みとられる。図 4 に結果を示す。中低緯度においては、Pc 1 は主に夜側に見られ、出現頻度の peak は 04 時 (LT) 付近にある。これは KAWAMURA (1970) による結果とも一致するものである。一方昭和基地における Pc 1 は主に昼側に多く出現している。Peak は正午を少しすれて 13h-14h (LT) になっている。

図 4 には示していないが、Pc 1 の出現頻度は、特に中低緯度において顕著な季節変化を示す。女満別では Pc 1 は冬に多く観測されるが、夏にはほとんど見られない。このような顕著な季節変化は昭和基地ではみられない。中低緯度における Pc 1 出現頻度の顕著な季節変化は、日照時間の長短による電離層電子密度の季節変化によって Pc 1 の電離層伝搬の状態が影響される結果であると考えられる (TEPLEY *et al.*, 1965; TEPLEY and LANDSHOFF, 1966; MANCHESTER, 1966; JACOBS and WATANABE, 1966).

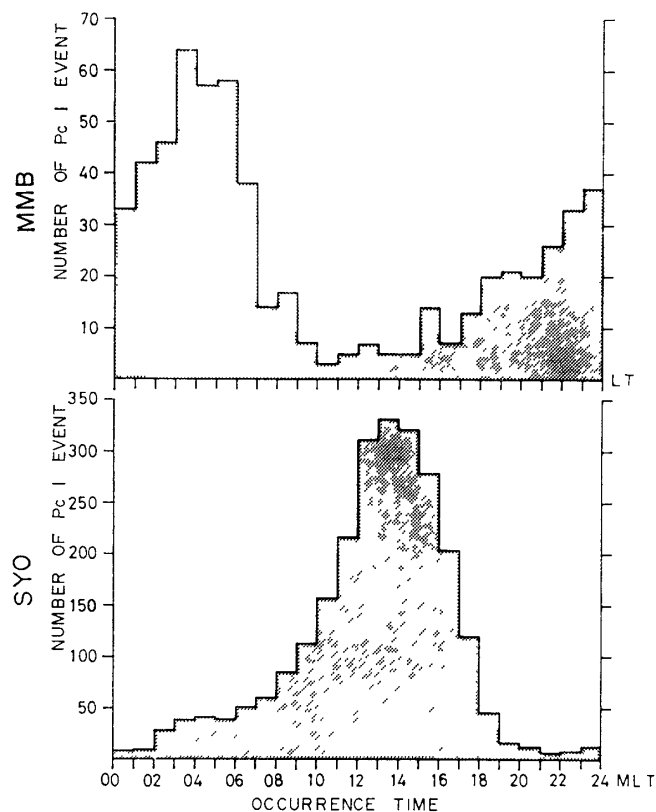


図 4 女満別 (上) と昭和基地 (下) における Pc 1 の出現頻度の日変化
 Fig. 4. Diurnal variations in frequency of occurrence of Pc 1 events at Memambetsu (upper) and at Syowa Station (bottom).

3.2. 中心周期

2 節で、1-2 例についてのみではあるが、中低緯度と高緯度での Pc 1 の中心周期に大きな差のあることを指摘したが、統計的に調べた結果を図 5 に示す。女満別では Pc 1 の中心周期が 1.2-1.3 秒 (約 0.88 Hz) であるが、昭和基地では明らかにそれよりも長く 2.5-3.0 秒 (0.4-0.3 Hz) である。ここに再度確認するが両観測点には同等の特性を有する観測装置が設置されており、したがって図 5 にみられる周期の違いは観測装置による違いではない。このことから Pc 1 の発生機構としては、proton によるサイクロトロン不安定が考えられるとしても (CORNWALL, 1965), Pc 1 の発生領域については中低緯度の Pc 1 と、高緯度の Pc 1 に対して 2 つを考える必要がある。なお、図 5 で女満別では周期 5 秒以上 (0.2 Hz 以下) の現象は観測されていない。これは電離層ダクト伝搬における減衰効果が長周期帯で大きいと考えれば説明できる (MANCHESTER, 1966)。

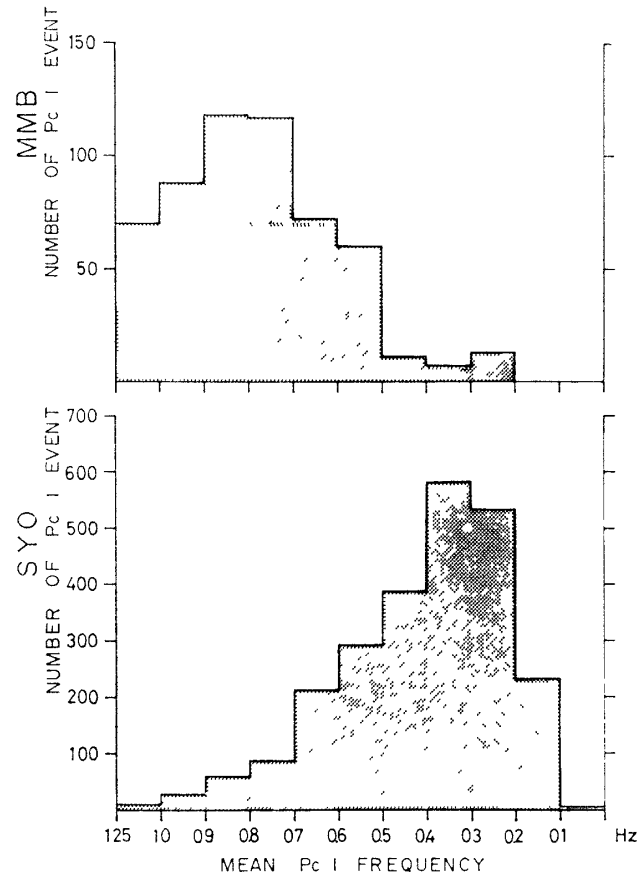


図 5 女満別 (上) と昭和基地 (下) における, 中心周波数ごとの Pc 1 の出現頻度

Fig 5. Histograms of occurrence frequency of Pc 1 events as a function of the observed mean frequency, at Memambetsu (upper) and at Syowa Station (bottom)

3.3 赤道面環電流と Pc 1 との関連

KAWAMURA (1970) によって, 中低緯度 Pc 1 は, 比較的大きな磁気嵐が起きたあとの recovery phase に数日間続いて出現するという傾向が報告されている. これは赤道面環電流の消長と Pc 1 の発生機構との間に何らかの関連のあることを示唆するものである (JACOBS and WATANABE, 1966). これをさらに定量的に調べるために 1977 年 4 月の 1 カ月間での *Dst* index と Pc 1 の出現頻度との関連をみしてみる. 結果を図 6 に示す. 女満別においては, 両者の間に次のようなきわめて顕著な関係がみられる. すなわち急激な *Dst* index の増加 (磁気嵐の出現, あるいは赤道面環電流の発達) に続く recovery phase において Pc 1 が多く出現している. このことは赤道面環電流を形成するプロトンのエネルギーが, 波動-粒子相互作用によって磁気流体波動のエネルギーに変換されることにより Pc 1 が出現してくるという model を示唆するものである. 中低緯度で観測される Pc 1 はこのような機構によって発生される

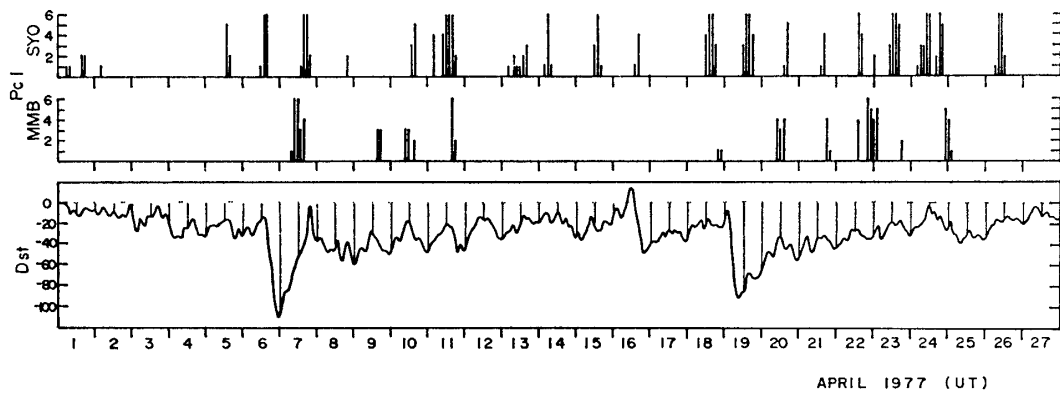


図 6 1977 年 4 月 1 日-27 日の期間における Pc 1 の出現頻度 (上・昭和基地, 中・女満別) と Dst 指数 (下)

Fig 6 Pc 1 occurrence at Syowa Station (upper) and at Memambetsu (middle), and Dst index (bottom) for the interval of April 1-27, 1977.

と考えられよう. 一方, 昭和基地においては Dst index と Pc 1 の出現との間に顕著な関係はみられない. 高緯度 Pc 1 については別の発生領域を考えるべきであることが示唆される.

4. Pc 1 波動の磁気圏赤道面上における伝搬路の推定

2 節および 3 節の結果により, 中低緯度 Pc 1 および高緯度 Pc 1 はその発生領域が異なると推定される. さらに直接的に確認するために Pc 1 波動の磁気圏赤道面上における伝搬路を推定して, 両者について比較することを試みる. 女満別と昭和基地で同時に観測された Pc 1 の例を図 7 に示す. 両者共に pearl pulsation で rising tone がみられるが, 周期は著しく異なっている. 女満別で観測されている Pc 1 の中心周期は約 1.5 秒であるのに対して, 昭和基地での中心周期は 2.3-2.9 秒である.

Pearl pulsation の rising tone から Pc 1 wave の伝搬路の磁気圏赤道面上の位置が推定できることが, 理論的にも実験的にも確かめられている (WENTWORTH, 1966; SAKURAI, 1975). 推定の手順は次の通りである. Pc 1 wave の発生と関連するプロトンの磁気圏赤道面上におけるサイクロトロン周波数 f_c は次式で与えられる.

$$f_c = \frac{f_2(T_2/T_1)^a - f_1}{(T_2/T_1)^a - 1}, \quad (1)$$

ここに f_1, f_2 は rising tone の下限および上限の周波数であり, T_1, T_2 はそれぞれに対応するくり返し周期である. a は磁気圏磁場の形に依存する係数であり, Mead model を使うと真夜中で 1.56, 真昼で 1.41 の値になる. f_c は磁場のみに依存するから, 適当な磁場 model

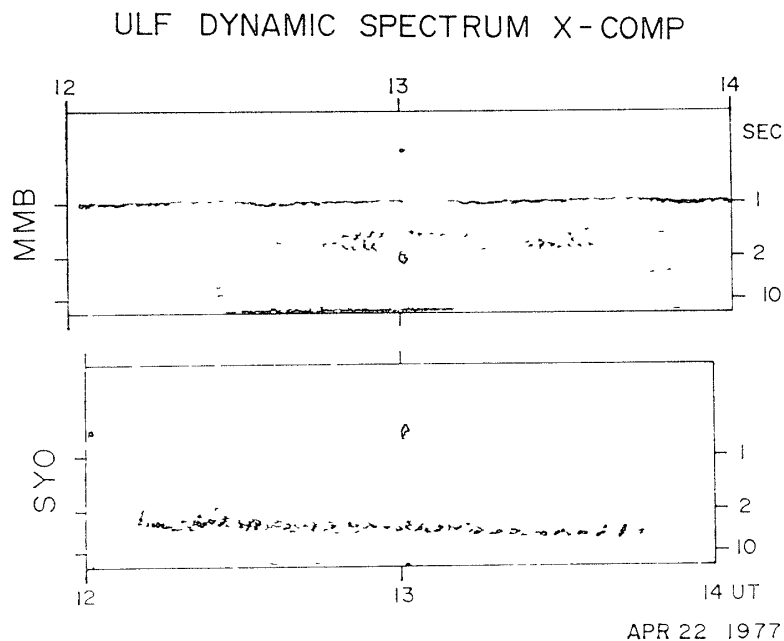


図 7 女満別 (上) と昭和基地 (下) で同時に観測された Pc 1 event

Fig. 7 Simultaneous appearance of the pearl pulsation type of Pc 1 event at Memambetsu (upper) and at Syowa Station (bottom)

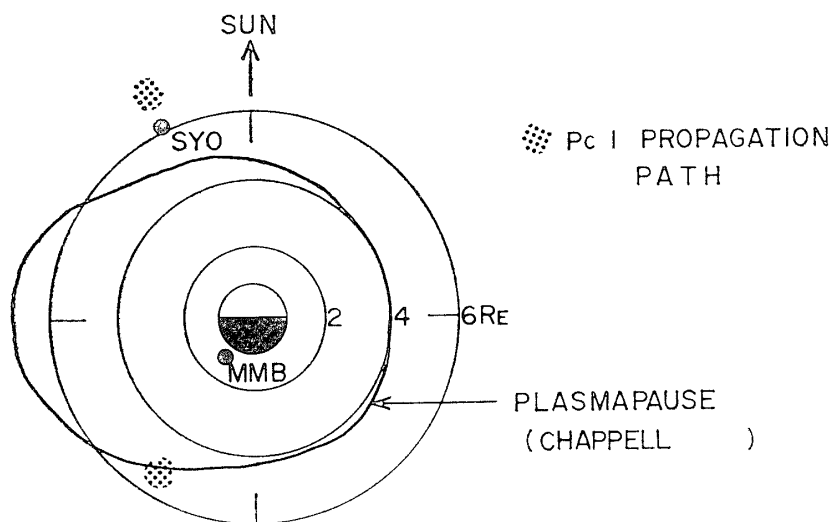


図 8 図 7 に示される Pc 1 event の赤道面上における伝搬路 CHAPPELL (1972) によって出された平均的な plasmapause の位置も示してある

Fig. 8. Equatorial positions of the propagation path of the Pc 1 events shown in Fig. 7. The average position of the plasmapause derived by CHAPPELL (1972) is also indicated

を与えることによりサイクロトロン不安定が起こっている．赤道面上での位置， R ，を推定することができる．Mead model では次のようになる．

$$\begin{aligned} R &= (1256/f_c)^{0.27} \quad (\text{真夜中}), \\ R &= (147/f_c)^{0.46} \quad (\text{真昼}). \end{aligned} \quad (2)$$

図 7 において，女満別については 1250 UT (2150 LT) 付近，昭和基地については 1340 UT (1340 MLT) 付近の Pc 1 について，伝搬路を推定した．女満別では真夜中の，また昭和基地については真昼の磁場 model を仮定した．その結果，女満別については $R=5.1$ ，また昭和基地については $R=7.0$ という値を得た．磁気圏赤道面上に投影したものを図 8 に示す．

図 8 には，CHAPPELL (1972) によって出された plasmopause の平均的な位置もあわせて示している．女満別で観測される Pc 1 は plasmopause 付近に源があることが推定されるが，昭和基地における Pc 1 の源は plasmopause よりも外にあるらしい．1 例についてのみではあるが，中低緯度 Pc 1 と高緯度 Pc 1 の発生領域の違いが直接的に確かめられた．

5. ま と め

本論文で示してきた結果は次のように，まとめられる．

- 1) 中低緯度 Pc 1 は夜側に出現頻度が高く，peak は 04h LT 頃にあるのに対し，高緯度 Pc 1 は昼側に出現頻度が高くて，peak は 13h LT 頃にある．
- 2) 中低緯度 Pc 1 の中心周期は，1.2–1.3 秒が最も多いが，高緯度 Pc 1 の中心周期はそれよりも長くて 2.5–3.0 秒が多い．
- 3) 中低緯度 Pc 1 は，赤道面環電流の消長と良い相関を示し，磁気嵐の recovery phase に多く出現する．高緯度 Pc 1 については，このような関連は見られない．
- 4) 中低緯度 Pc 1 の発生領域は plasmopause 付近にあるが，高緯度 Pc 1 の源はさらに外にあるらしい．

以上の結果から，Pc 1 の発生領域として plasmopause のほかに別なものを考えなければならないことが強く示唆される．具体的な model は現在はないが，さらに解析を進めていくことにより明らかにしていきたい．

謝 辞

本研究を進めるにあたって，国立極地研究所福西浩助教授，鮎川勝助手にご配慮をいただいたので，感謝の意を表します．

文 献

- BENIOFF, H (1960) Observations of geomagnetic fluctuations in the period range 0.3 to 120 seconds J Geophys Res , **65**, 1413–1422.
- CHAPPELL, C R (1972) Recent satellite measurements of the morphology and dynamics of the plasmasphere Rev Geophys Space Phys , **10**, 951–979
- CORNWALL, J M (1965) Cyclotron instabilities and electromagnetic emission in the ultra low frequency and very low frequency ranges. J Geophys Res , **70**, 61–69.
- HEACOCK, R R and HESSLER, V. P. (1962). Pearl-type telluric current micropulsations at College. J. Geophys Res , **67**, 3985–3995.
- HEACOCK, R. R and HESSLER, V. P. (1965) Pearl-type micropulsations associated with magnetic storm sudden commencements J Geophys. Res , **70**, 1103–1111.
- JACOBS, J. A and WATANABE, T (1966) Amplification of hydromagnetic waves in the magnetosphere by a cyclotron instability process with applications to the theory of hydromagnetic whistlers J. Atmos Sci , **28**, 235–253.
- KATO, Y and SAITO, T. (1964) Observation of Pc 1 and Pi 1 by a visual type induction magnetometer at middle latitude station, Onagawa Rep Ionos Space Res Jpn , **18**, 188–196.
- KAWAMURA, M (1970) Short-period geomagnetic micropulsations with period of about 1 second in the middle and low latitudes. Geophys Mag , **35**, 1–54
- KAWAMURA, M (1977) Preliminary report of magnetic pulsations during January-June 1976 The Kakioka Magnetic Observatory, 1–48
- KAWAMURA, M and KUWASHIMA, M. (1977) On the geomagnetic pulsation Pc (Part II), Middle- and low-latitude Pc-3 Mem Kakioka Magn. Obs , **17** (1), 7–18
- KOKUBUN, S (1970) Fine structure of ULF emissions in the frequency range of 0.1~2 Hz. Rep. Ionos Space Res Jpn , **24**, 24–44
- KOKUBUN, S and OGUTI, T (1968) Hydromagnetic emissions associated with storm sudden commencements Rep Ionos Space Res. Jpn , **22**, 45–59
- KUWASHIMA, M (1978) Wave characteristics of magnetic Pi 2 pulsations in the auroral region—Spectral and polarization studies Mem Natl Inst Polar Res , Ser. A (Aeronomy), **15**, 79 p.
- MANCHESTER, R N. (1966): Propagation of Pc 1 micropulsations from high to low latitudes. J Geophys. Res , **71**, 3749–3754
- SAITO, T. (1960) Period analysis of geomagnetic pulsations by a sonagraph method. Sci Rep. Tohoku Univ , Ser. 5, Geophys , **12**, 105–113.
- SAITO, T. (1969): Geomagnetic pulsations Space Sci Rev , **10**, 319–412.
- SAKURAI, T. (1975): Variations of magnetospheric convection electric fields during substorms as inferred from Pc 1 hydromagnetic waves Planet Space Sci , **23**, 611–618.
- TEPLEY, L. R and LANDSHOFF, R K (1966): Waveguide theory for ionospheric propagation of hydromagnetic emissions J. Geophys. Res , **71**, 1499–1504.
- TEPLEY, L. R , HEACOCK, R R and FRASER, B. J (1965). Hydromagnetic emissions (Pc1) observed simultaneously in the auroral zone and at low latitudes. J Geophys. Res , **70**, 2720–2725
- TROITSKAYA, V A. (1967). Micropulsations and the state of the magnetosphere Solar-Terrestrial Physics, ed. by J W. KING and W. S. NEWMAN, New York, Academic Press, 213–274.
- WENTWORTH, R. C. (1966): Recent investigations of hydromagnetic emissions, part II Theoretical interpretation. J. Geomagn Geoelectr., **18**, 257–273

(1979 年 5 月 13 日受理)